



利用TOPCon技術製作效率22.5%之交指式背接觸太陽能電池

張瀚丞博士 / 工研院 綠能所 太陽光電技術組, 研究員

自背接觸太陽能電池 (Back Contacted solar cells, BCsc) 的概念被提出以來便成為高效率太陽能技術領域的熱門研究項目之一。最早發展的背接觸太陽能電池稱之為交指式背接觸 (Interdigitated Back Contact, IBC) 電池，係指電池正面無電極、正負兩極金屬導線呈指狀交叉排列於電池背面。IBC電池最大的特點是PN接面和金屬接觸都處於電池的背面，正面沒有金屬電極遮蔽的影響，具有更高的短路電流 (J_{sc})，背面可容許較寬的金屬線來降低串聯電阻 (R_s)，從而提高填充因子 (FF)，使得這種正面無遮擋的電池不僅轉換效率高，且全背電極的模組更易於接線裝配。在本文章中，我們將介紹交指式背鈍化接觸 (Interdigitated Back Passivated Contact, IBPC) 太陽能電池，一種具有鈍化接觸結構的新型背接式異質接面 (Heterojunction) 型太陽能電池的實踐方法與其元件整合。

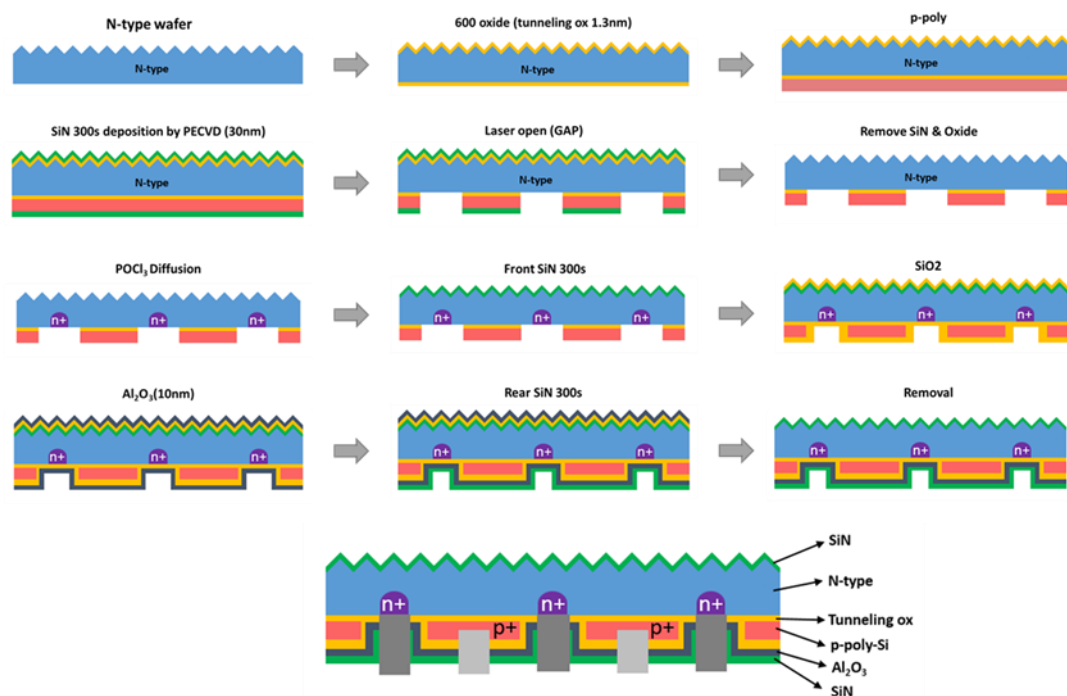
一、前言

隨著市場對太陽能電池效率之要求越來越高，使得p型 (p-type) 矽晶太陽能電池在效率瓶頸困境越發明顯，而n型 (n-type) 矽單晶太陽能電池具有高載子壽命、無光致衰減等優點，有利於提升效率及穩定性，成為太陽光電領域的新興研發熱點。以n型矽晶圓為基材所製作的指標性高效率電池有二：本質薄層異質接面 (Heterojunction with Intrinsic Thin layer, HIT) 太陽能電池以及背接觸太陽能電池，根據這兩種結構製作的n型電池均可達到23%以上的轉換效率。其中，背接觸太陽能電池可與現行的網印製程兼容，相較於HIT電池具有低成本的生產潛力。根據ITRPV的年度報導，在未來十年內，背接觸太陽能電池的市佔率將逐步提升至20%-30% [1]，原因有二：一是n型晶圓的生產成本水平逐漸與p型晶圓相當；二則是n型電池的生產技術逐漸成熟所致。在接下來的討論中我們將介紹工研院綠能所矽基太陽能電池研究室所研發的IBPC，其為具有鈍化接觸結構的新型背接式異質接面太陽能電池，並揭露該類電池的關鍵製程。

二、新型交指式背鈍化接觸太陽電池製作

綜觀全世界近年在各式的太陽能電池商業上的發展，以矽晶太陽能電池的市佔比最重，而光電轉換效率上最高的異質接面背接觸電池（Heterojunction with interdigitated Back Contacts, HBC），結合異質接面（HSC）與背接觸電池（IBC）的結構，可達到26.8%，這樣的太陽能電池結構但是低成本高產能的製程方式將會成為矽晶太陽能電池未來的研發主流，然而高效率的背接觸電池的製程方法需要多道微影步驟，用來製作微小接點和金屬導線，不管時間或研發成本都得大幅增加，因此要開發高效的IBC/HBC太陽能電池在一般企業或實驗室是很難達成的。2015，工研院綠能所和清華大學共同合作的研究團隊利用了主流PERC電池的製造技術，在傳統的IBC電極佈局與相近的電池規格下（pitch size = 1200 μm ，emitter area = 850 μm ），分別製作了p型與n型兩種網印型交指式背接觸太陽能電池（Screen-Printed Interdigitated Back Contact solar cells, SP-IBC）並進行了詳盡的探究，詳細內容可參閱我們過往發表的文獻 [2, 3]。而自2018年開始，工研院綠能所矽基太陽電池研究室開始以新型IBPC開發，以具有新型異質接面的背接式鈍化接觸太陽電池為開發重點，利用了近年異質接面技術開發新主流的穿隧氧化鈍化接觸（Tunnel Oxide Passivated Contact, TOPCon）電池的製造技術並且透過新電極圖案及結構設計，突破IBC在成本及尺寸瓶頸，採用傳統的爐管方式，解決設備昂貴及良率不佳的問題。在圖形化方面建置多功能雷射開線平台與網印對位平台，在鈍化接觸技術方面利用可批次生產的穿隧氧化層與多晶矽來達到優異的表面鈍化效果。針對新型IBPC太陽電池開發，技術重點包括：（1）背電極圖形最佳化設計：降低電極厚度，縮短製程時間，增加良率，（2）鈍化接觸技術開發：採用多晶矽鈍化技術取代擴散製程，改善均勻性並降低成本，（3）對位精準度技術開發：射極與金屬電極接觸面積增加使串聯電阻下降、填充因子上升。

我們首先找尋可以模擬交指式背接觸（IBC）和異質接面（HIT）太陽電池的軟體。在已知的異質接面太陽電池結構，由於沉積的非晶矽（a-Si）層有更好的表面鈍化，使得元件能有較高的開路電壓（ V_{oc} ）和短路電流（ J_{sc} ），但往往導致非常低的填充因子（FF），而IV曲線圖呈現“S”形。因此，我們運用Synopsis TCAD軟體，藉由TCAD對於背電極結構的模擬，降低IBPC研發的時間與成本。本次年度模擬參考了FY108工研院製作的高效IBPC太陽能電池結構，元件流程圖及參數如下圖1和表1，製作出的元件可達18.98%的轉換效率（如圖2），EQE的結果在Position C（圖3）可見光的部分可達接近百分之百，因此TCAD建模的部分將以結構和設定參數為主要基準去擬合最接近的效率。



圖一、IBPC電池製造流程

表1、IBPC太陽能電池參數

Parameter	Magnitude / Description
Wafer thickness	180 μm
Bulk lifetime	1000 μs
Bulk sheet resistance	3 $\Omega\text{-cm}$
Light doping n^+ FSF sheet resistance	200 Ω/sq
BSF collector sheet resistance	40 Ω/sq
Emitter sheet resistance	500 Ω/sq
Al/Al-alloyed emitter contact resistance	1E-04 $\Omega\text{-cm}^2$
Al/POCl ₃ -diffused BSF contact resistance	1E-04 $\Omega\text{-cm}^2$

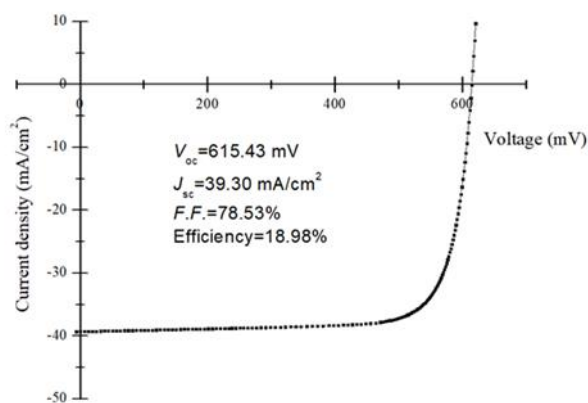


圖2、IBPC太陽能電池IV曲線

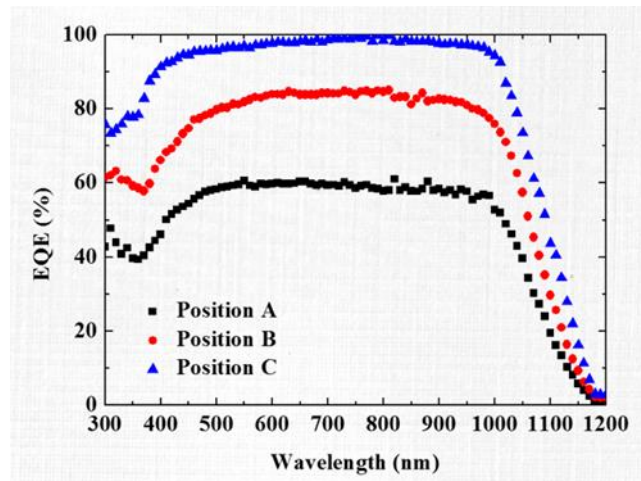


圖3、IBPC太陽能電池EQE曲線

本次計畫中使用Sentaurus TCAD科技輔助設計軟體模擬矽基背電極（IBC）太陽能電池效率，電池結構與參數設定可參考圖4與表2，模擬元件在未照光時的暗電流曲線如圖5，元件照光後的擬合結果部分如圖6，光電流部分由於是以雙層抗反射膜取代pyramid結構，故 J_{sc} 較真實情況低 $0.9\text{mA}/\text{cm}^2$ ，其餘參數的擬合皆控制在誤差1%以下。

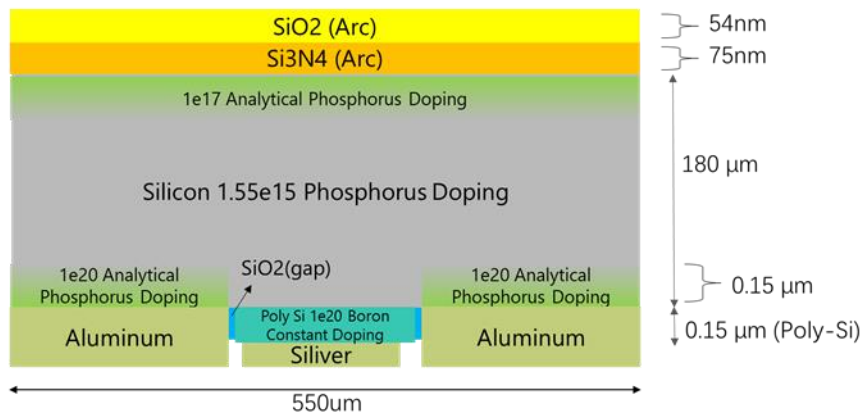


圖4、IBC太陽能電池元件模擬結構

表2、IBC太陽能電池元件模擬參數

Parameter	
Spectrum / Pin	AM1.5g_12um / 100 (mW)
Substrate doping	$1.55 \times 10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$
Front Surface doping / depth	$1 \times 10^{17} \text{ (cm}^{-3}\text{)} / 0.25 \text{ (um)}$
Front Surface Trap density	$1 \times 10^{10} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$
Front Surface recombination velocity	100 (cm/s)
Emitter doping	$1 \times 10^{20} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ constant doping
BSF doping / depth	$1 \times 10^{20} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ at peak analytical N-doping / 0.3 (um)
Back Surface recombination velocity	50 (cm/s)
Electrode resistivity	$1 \times 10^{-3} \text{ (ohm*cm)}$
Bulk lifetime	1 (ms)
Total width	550 (um)

此次模擬利用雙層抗反射膜取代pyramid結構，透過公式計算並模擬出最大的 J_{sc} 發生於二氧化矽54nm和氮化矽75nm時，在AM1.5G光譜的照射下光電流（圖6）可達到38.42（mA/cm²），且總反射率（圖7）可達16.7%，EQE結果如圖8，可與pyramid加上單層氮化矽結構有接近的效果。

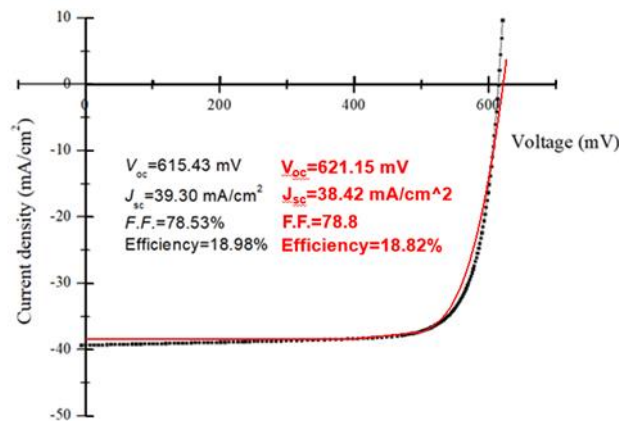


圖5、IBPC太陽能電池光電流IV曲線擬合

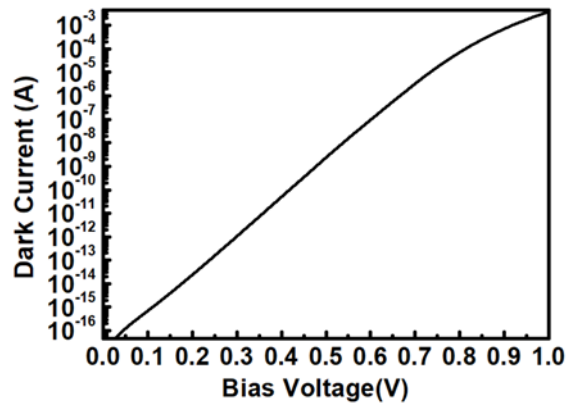


圖6、IBPC太陽能電池元件暗電流IV曲線

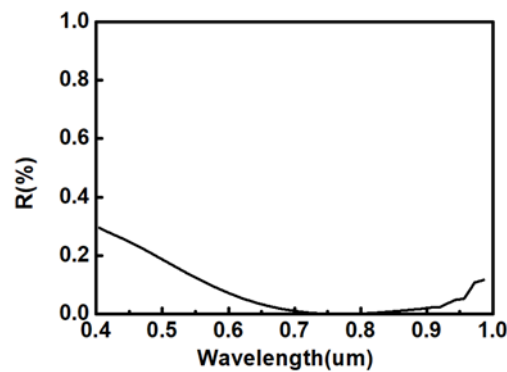


圖7、入射光各波長對應反射率

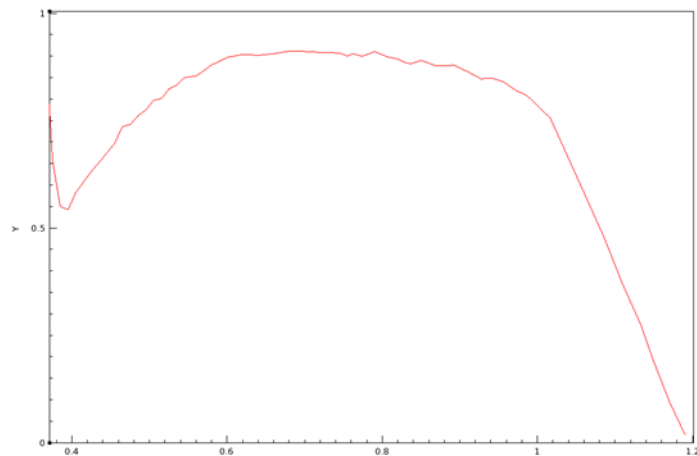


圖8、EQE曲線圖 (x軸:wavelength (um) y軸:EQE)

Base doping為符合 $\text{resistivity} = 3\Omega \cdot \text{cm}$ 設定為 $1.55\text{E}+15$ ，前表面 (FSF)、背表面 (BSF)、射極 (Emitter) doping濃度設定亦為經過公式計算後擬合工研院所提供的薄膜電阻值。吸收層厚度的設定經過TMM (Transfer Matrix Model) 模擬會有因底部反射而導致相消干涉的情況 (圖9)， J_{sc} 的值會隨基板厚度不同而有局部震盪性的變化，約在厚度 $180\mu\text{m}$ 附近會有最大的 J_{sc} 值。在Sentaurus SDevice裡面可以各材料參數

已有內建檔案，不需做額外更改，唯物理模型及物理機制需要自行設定。再本年度模擬中擬引入以下五種之模型。（1）Effective Intrinsic Density：在半導體材料中參雜過重時會產生能隙窄化的現象，會使半導體更趨向導體的特性化，尤其在射極和BSF區域的高濃度參雜，為了模擬開路電壓準確度的提升，故在本年模擬中加入此物理模型。（2）Mobility Doping Dependence：載子遷移率會受到參雜濃度的影響，參雜濃度愈高時遷移率越低，故引入此模型以求得正確模擬。（3）Shockley-Read-Hall and Auger Recombination：SRH複合是太陽能電池內非常重要的，是由於陷阱能帶輔助複合的機制，SRH的複合受生命週期影響劇烈，在多晶矽區域尤為明顯。Auger複合會因為參雜雜質濃度提升而加劇，因此在BSF和Emitter區域都為高Auger複合區域（圖10）。（4）Transfer Matrix Model：TMM的使用是為了光學計算上模擬入射光的部分，因為是利用各深度的折射率去進行計算，只適用一維材料部分，故無法使用金字塔結構進行模擬，底部的部分則以黃金的折射率，因此使用此模型需要考慮底部反射光線消相干涉的情形。（5）Trap：我們在表面加入了Trap模型，使用Acceptor當作缺陷的類型，此模型可設定載子抓取能力（capture cross section）以及Trap能階所在位置，此模型的設定可以使電子在表面被複合，因此被複合的少數載子（電洞）會減低，模擬結果顯示無缺陷能階設定的元件在各方面表現皆較差，且真實元件本身亦存在表面缺陷能階，故引入缺陷能階的設定。

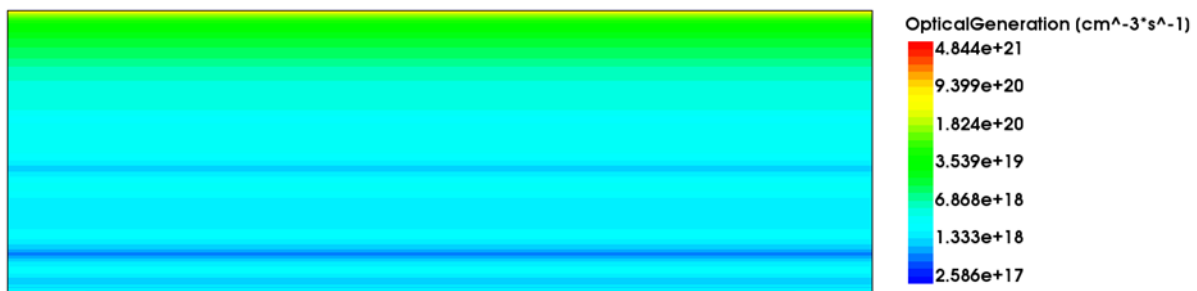


圖9、模擬元件Optical Generation分布（上方為入光面）

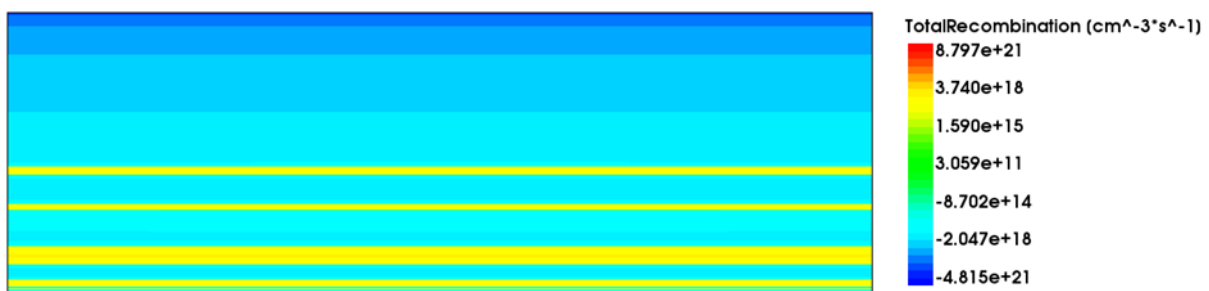


圖10、模擬元件Total Recombination分布（上方為入光面）

透過元件特性模擬，針對單層及多層結構特性，確定重要參數之設定是否恰當。結合實驗結果與模擬可以解析IBPC太陽電池所需改進的相關參數，進而減化實驗的數量與確立達到25%效率所需之各項參數，並提供實驗規劃的方向。圖11顯示了多晶矽鈍化的背接式太陽電池結構，結構分為5大區塊，包含：（1）前電場鈍化區、（2）n-type多晶矽鈍化區（n+ poly-Si）、（3）p-type多晶矽鈍化區（p+ poly-Si）、（4）間隙鈍化區、（5）電極與多晶矽接觸區。針對不同的區域，需設計不同的實驗以獲得所需的參數。所需的參數包含：影響太陽電池效率的各項因子，光學與電性的影響。效率計算的公式如下所示：

$$\eta = FF \times V_{oc} \times J_{sc} / P_{in}$$

其中FF為填充因子， V_{oc} 為開路電壓， J_{sc} 為短路電流， P_{in} 為輸入功率。填充因子由串聯與並聯阻抗所影響，開路電壓則由晶片載子復合所影響，短路電流則由光學特性與載子的複合所影響。藉由輸入各區塊的參數，可分析各區塊對太陽電池效率各因子的影響。

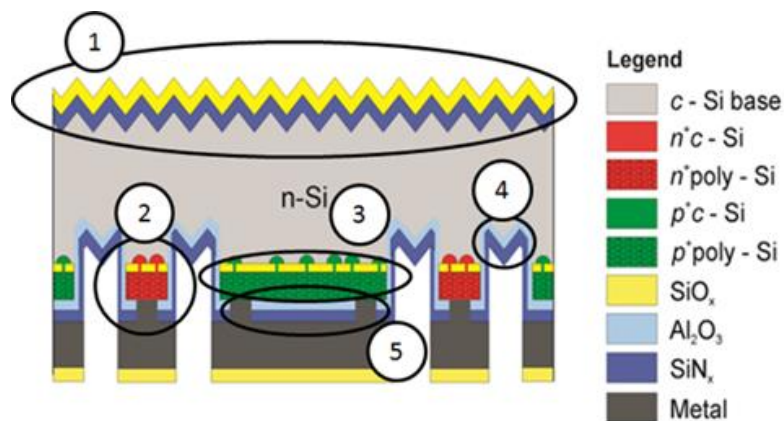


圖11、多晶矽鈍化的IBPC太陽電池結構最重要的5個部分

區塊①，為晶片受光面的鈍化與光學抗反射的特性，採用SiNx與SiOx兩層結構，實驗設計上可以製作雙面具有金字塔的晶片，沉積SiNx與SiOx，萃取鈍化參數逆向飽和電流（ J_0 ）與少數載子生命時間（lifetime），藉由光學量測可獲得折射細數與消光係數，做為光學特性模擬的參數，並針對雙層抗反射薄膜進行材料特性與厚度的最佳化。區塊②n型多晶矽鈍化區（n+poly-Si）、與區塊③p型多晶矽鈍化區（p+poly-Si），可藉由氧化層製作，沉積n型或p型多晶矽於氧化層上，進行參數萃取。參數包含鈍化特性與薄膜片電阻（sheet resistance）與接觸電阻（contact resistance）。鈍化特性包含：逆向飽和電流、與少數載子生命時間，用來決定鈍化效果，影響開路電壓。片電

阻與接觸電阻則影響了填充因子，影響這兩個因子的參數包含了氧化層的厚度、摻雜層的厚度、摻雜層的濃度與電極接觸面積的大小（區塊⑤）。除此之外，n+poly-Si與p+poly-Si的寬度比例會影響載子收集的效果。晶片吸收太陽光後會產生電子-電洞對，n+poly-Si用以收集電子，而p+poly-Si用以收集電洞。電子在內建電場作用下漂移（drift）移動到達電極，因此拉大n+poly-Si的間距會造成阻值的增加，影響填充因子。相對地，p+poly-Si收集電洞，電洞為少數載子，主要以擴散（diffusion）方式移動到達電極，故p+poly-Si的寬度與距離會影響載子的複合，當p+poly-Si區域降低或間距拉大時，會造成載子無法擴散至p+poly-Si區域而收集效率差，影響短路電流。因此，在幾何寬度與密度的設計上，可藉由模擬來最佳化。區塊④為間隙鈍化層，間隙的鈍化效果會影響開路電壓，因此，藉由此結構可以獲得鈍化相關的參數，少數載子生命時間與逆向飽和電流。從參數結構之分析結果獲得所需的參數，利用參數進行模擬分析，有助於進一步提升電池效率，了解技術需改善的方向，持續朝高效率太陽電池研發前進。

IBPC元件的優勢在於鈍化電極有著較佳的元件效率表現，以及正負電極全整合於被光面減少遮蔽效應，因此如何製作鈍化電極解決正負極因接觸使元件短路的現象發生，將會是元件製作的關鍵技術。

FY109製作之IBPC太陽電池元件利用p+ poly Si作為鈍化電極，可以減少IBPC元件吸光後，載子的複合現象，因此表面鈍化將是元件製作的首要目標，元件之受光面為織化（textured）面，而背光面為拋光（polished）面，由於表面形貌將決定不同的鈍化技術，由圖12可以發現，在織化面SiNx能提供最佳的鈍化效果（複合電流密度 J_0 最低），反之在拋光面SiNx/Al₂O₃則有較佳的鈍化效果。

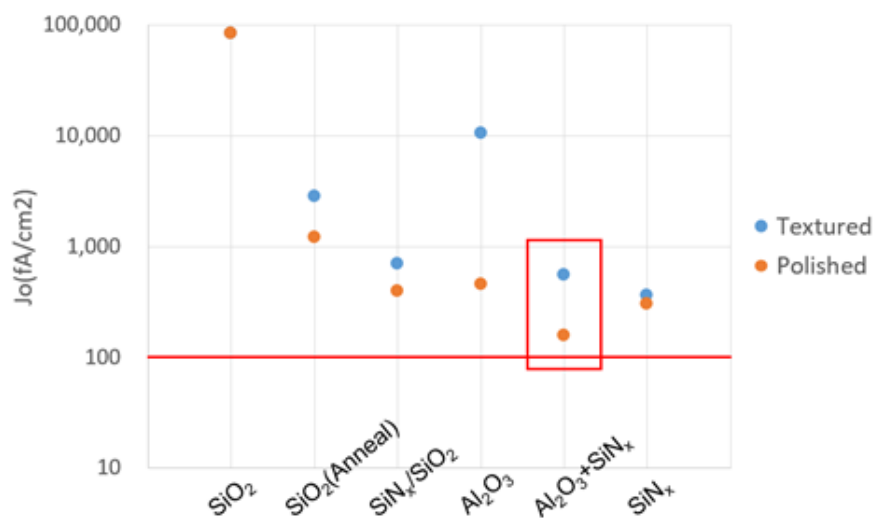


圖12、各種表面鈍化材料的複合電流密度

在背電極的製作上，採用雷射開孔及網印金屬的技術，首先雷射開孔的目的是為了破壞介電層，使導電層與網印金屬能獲得良好接觸降低元件串聯電阻，由於正負電極皆位於背光面，如何降低雷射開孔的誤差，則能有效避免電極短路的問題，因此FY109工研院和友晁能源合作開發高精準對位雷射機台，藉由調整雷射光路，雷射參數調整優化，可使對位精準度對位偏差 $\leq 10\ \mu\text{m}$ （圖13）。

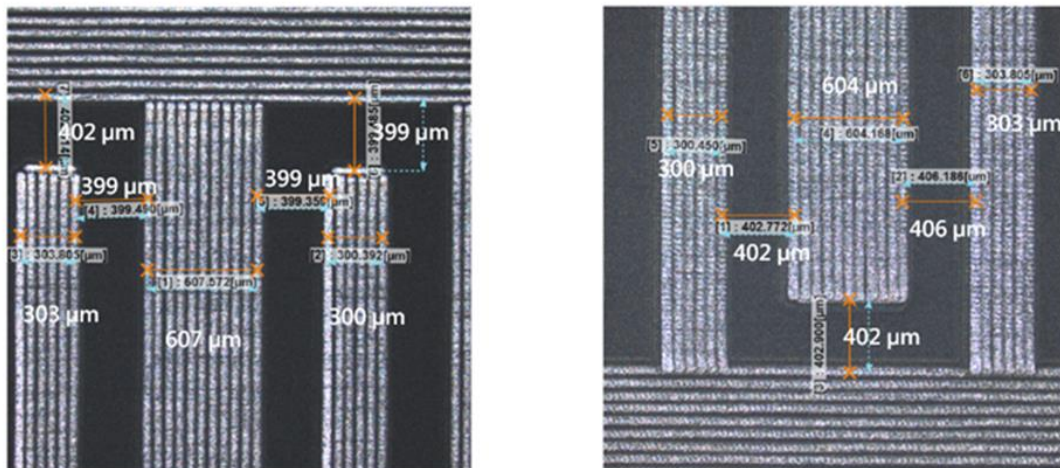


圖13、光路及參數調整後之GAP寬度OM圖

IBPC的關鍵是以磷擴散製程製作BSF（圖11中區塊②）與FSF時存在溢鍍問題，使得現行的製程難以製備出6吋商規電池面積的IBPC結構，此項問題則需倚靠製程設備的改良方得以解決。為解決圖11中區塊②以及區塊③之短路問題，我們經由實驗結果推測可能是由於磷擴散之後，磷會和硼摻雜的 p^+ poly產生交叉污染造成漏電流（shunt）甚至是短路，因此，我們於磷擴散之前先長一層阻障層（barrier layer），可以有效避免交叉污染的問題。而IBPC之另一關鍵技術為雷射熔蝕後的晶片清洗步驟，由於雷射製程是在大氣環境下進行，在熔蝕過程中矽晶片表面會與周遭氣氛中的氧氣反應進而生成矽氧化層，需透過氫氟酸（hydrofluoric acid, HF）將這層氧化物移除。若沒有進行HF步驟，在製造流程不變的情況下，IBPC的電池效率驟降為原先的1/10，足見雷射後蝕刻製程的重要性，除了透過HF蝕刻步驟移除雷射引致的氧化層之外，雷射加工對材料所造成的雷射損傷（laser damage）改善亦可以透過雷射參數優化，以及雷射源選用皮秒或飛秒雷射來解決電池性能折損的問題 [4]。最後，我們於元件再以原子層沉積（ALD）技術鍍上一層 Al_2O_3 ，提升鈍化的效果， V_{oc} 可提升至687.3 mV，元件效率可達22.52%如圖14。

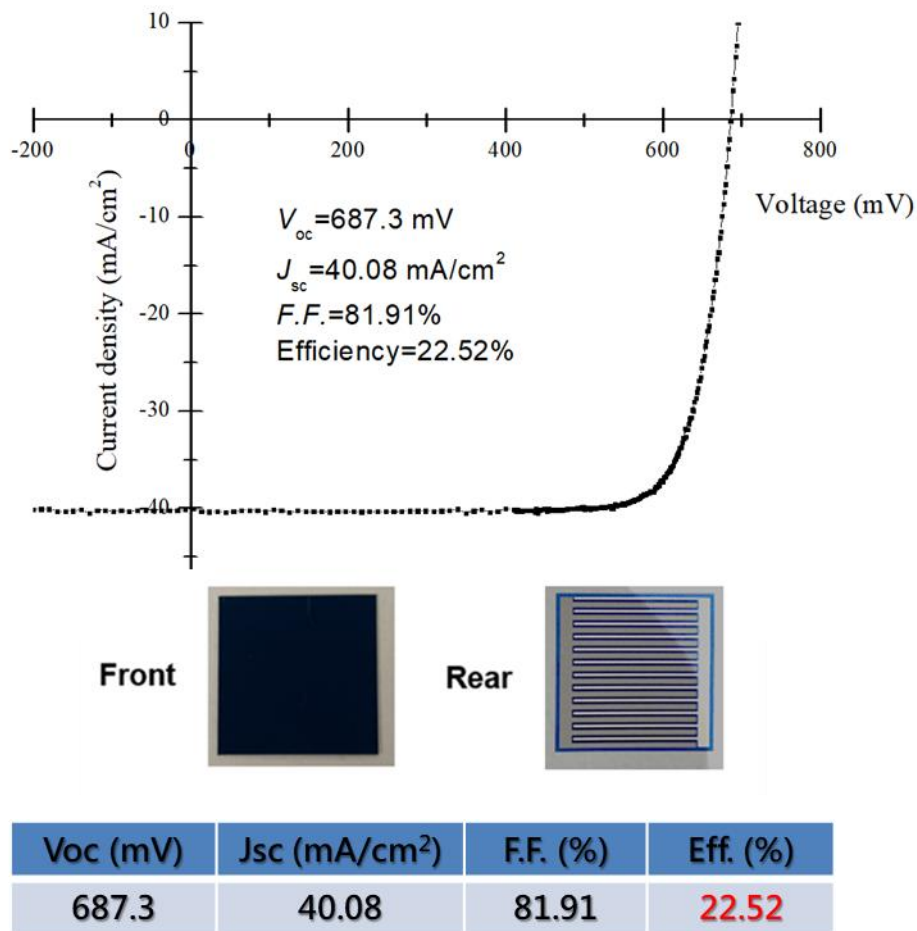


圖14、FY109 IBPC電池元件效率

三、結論

最後，太陽能產業是薄利產品因此主宰太陽能價格的矽晶電池將會是永遠無法取代的主流產品。傳統IBC太陽電池效率雖可>25%，但製程複雜，難被產業界接受，因此工研院綠能所矽基太陽電池研究室開發低成本高效率之簡易新型IBPC太陽電池，引入TOPCon技術，節省製程時間及設備投資，增進鈍化效果，達到高效率要求，並且以雷射及網印技術避開黃光微影技術，同時兼顧效率及成本考量，目前新型電極圖案化設計之IBPC電池效率達到22.52%，已具產業化潛力，這使得大面積的低成本高效率IBPC電池不再只是空談，而是具有商業化的可能性。再加上製造成本逐年下降的n型矽晶圓，我們認為只要能持續改進電池性能就有可能主宰太陽能市場。

新型IBPC太陽電池開發是我們研究室擴大前期計畫TOPCon太陽電池技術成果，朝下一代有潛力的產業技術所規劃，技術較創新、困難度較高。短期佈局於掌握核心技術及關鍵設備，低成本的圖案化技術是其中重要項目，目前亦與設備業者合作開發IBPC電池所需之精密圖案化網印及低損傷雷射劃線設備，連結國產化設備開發。另外導入多種電極形成技術，延伸電池技術結構專利及設備整合，促成短時間內從



TOPCon升級至IBPC電池模組商業化量產，期望能增加台灣太陽能電池業者在國際市場上的競爭力。

四、參考文獻

1. International Technology Roadmap of Photovoltaic (ITRPV) 2019.
2. P.Y. Hsin, Y.W. Peng, and J.Y. Gan, “High efficiency screen-printed p-Si interdigitated back contact cells: fabrication and analytical characterization,” IEEE Journal of Photovoltaics 7 (5) , 1284 (2017) .
3. Y.W. Peng, C.H. Chen, L.Y. Li, P.Y. Hsin, P. Yu, C.J. Huang, and J.Y. Gan, “Design, fabrication and characterization of n-Si IBC solar cells using PERC technology,” IEEE Journal of Photovoltaics 10 (2) , 383 (2019) .
4. Z. Du. C. Zhang, F. Li, R. Zhou, M. Hong, “Impact of laser-induced oxidation on silicon wafer solar cell’ s performance,” IEEE Journal of Photovoltaics; 6, 617 (2016)